

## Beschreibung

### Schaltkreis-Anordnung und Signalverarbeitungs-Vorrichtung

- 5 Die Erfindung betrifft eine Schaltkreis-Anordnung und eine Signalverarbeitungs-Vorrichtung.

10 Schallsignale weisen einen hohen Intensitätsbereich auf, das heißt eine hohe Dynamik von bis zu 120dB. Die Geräuschkulisse einer ländlichen Gegend bei Nacht entspricht ungefähr 20dB, wohingegen ein Gewehrschuss in der Nähe des Entstehens einen Schallpegel von ungefähr 140dB aufweist.

15 Aufgrund von Adaptionsprozessen im menschlichen Innenohr, bei denen die sogenannten äußeren Haarzellen eine wichtige Rolle spielen, erreicht das normale Gehör sowohl eine hohe Empfindlichkeit bei niedrigen Schallpegeln als auch eine hohe Toleranz bei hohen Schallpegeln. Der Schallpegel ist eine physikalische Größe, welche ein Maß ist für die Intensität  
20 des Schalls. Das Gehör passt seine Verstärkung dem aktuellen Schallpegel an und ist daher in der Lage, einen großen Dynamikbereich an Schallpegeln zwischen als leise empfundenem Schall und als laut empfundenem Schall abzudecken. Anschaulich wird ein großer Schallpegelbereich auf einen  
25 kleinen wahrnehmbaren Bereich zusammengedrückt. In diesem Zusammenhang spricht man von Dynamikkompression.

Bei der Kodierung von Sprache in Aktionspotentiale des Hörnerven wird der große Dynamikbereich der Schallsignale  
30 (bis zu 120dB) auf den begrenzten dynamischen Bereich der Sinneszellen bzw. eines neuronalen Systems (etwa 40dB) komprimiert.

Spracherkennungs-Systeme, Hörgeräte und Audio-  
35 Datenkomprimierung sind wirtschaftlich interessante Gebiete. Grundlagen der automatischen Spracherkennung sind beispielsweise [1] zu entnehmen.

In einem bekannten Spracherkennungs-System wird eine schnelle Fourier-Transformation ("Fast Fourier Transformation", FFT) zur spektralen Analyse von Schallsignalen verwendet.

- 5   Anschließend wird das erhaltene Amplitudenspektrum logarithmiert. Dies entspricht anschaulich einer Dynamikkompression mit logarithmischer Kennlinie.

- 10   Bei einer solchen schnellen Fourier-Transformation wird typischerweise ein Zeitfenster einer vorgegebenen Länge verwendet, was zu einer beschränkten Frequenz- und Zeitauflösung führt. Wird, wie in der Spracherkennung üblich, nur das Betragsspektrum verwendet, ist die Zeitauflösung durch die Länge des verwendeten Zeitfensters limitiert.
- 15   Problematisch bei der Verwendung eines Zeitfensters fest vorgegebener Größe ist, dass bei einer Veränderung des Spektrums nach der Rücktransformation ein Fehler erhalten wird, der auf der Endlichkeit des Zeitfensters beruht.

- 20   [3] offenbart eine Vorrichtung zum Verringern der scheinbaren Lautstärke eines Ausgabesignals in einem Rundfunksystem, die ein Frequenz-selektives Verstärkungsverringerungs-Netzwerk aufweist.

- 25   [4] offenbart eine Schaltungsanordnung zur Kompression des dynamischen Bereichs eines Eingabesignals.

- 30   Der Erfindung liegt das Problem zugrunde, eine Schaltkreis-Anordnung und eine Signalverarbeitungs-Vorrichtung bereitzustellen, mit denen eine verbesserte Dynamikkompression ermöglicht ist.

- 35   Das Problem wird gelöst durch eine Schaltkreis-Anordnung und durch eine Signalverarbeitungs-Vorrichtung mit den Merkmalen gemäß den unabhängigen Patentansprüchen.

Die Schaltkreis-Anordnung weist einen Resonator-Schaltkreis zum Generieren eines Ausgabesignals aus einem Eingangssignal auf. Der Resonator-Schaltkreis enthält eine Kapazität und ~~eine Induktivität~~, einen Eingang, an dem das Eingangssignal  
5 bereitstellbar ist und einen Ausgang, an dem das Ausgabesignal bereitstellbar ist. Ferner weist die Schaltkreis-Anordnung einen Steuer-Schaltkreis zum Steuern oder Regeln der Güte des Resonator-Schaltkreises auf, wobei  
10 der Steuer-Schaltkreis derart eingerichtet ist, dass er die Güte des Resonator-Schaltkreises abhängig von der Amplitude, vorzugsweise abhängig von dem Signalverlauf der Signalamplitude, des Eingangssignals und/oder des Ausgabesignals steuert oder regelt.

15 Mit anderen Worten wird vorzugsweise die Güte abhängig von dem Signalverlauf der Signalamplitude gesteuert oder geregelt, was anschaulich den Vorteil mit sich bringt, dass die Zeitabhängigkeit des Eingangssignals und/oder des Ausgabesignals selbst auf die Zeitabhängigkeit der Güte  
20 abgebildet wird, so dass ein quasi-instantanes, verzögerungsfreies Steuern der Güte ermöglicht wird. Jedoch ist zu betonen, dass das Steuern der Güte abhängig von dem Signalverlauf der Signalamplitude optional ist, es ist auch möglich, die Güte abhängig von der Amplitude zu steuern oder  
25 zu regeln.

Darüber hinaus ist erfindungsgemäß eine Signalverarbeitungs-Vorrichtung mit einer Schaltkreis-Anordnung mit den oben genannten Merkmalen bereitgestellt. Ferner enthält die  
30 Signalverarbeitungs-Vorrichtung eine Weiterverarbeitungseinheit zum Weiterverarbeiten des Ausgabesignals.

Eine Grundidee der Erfindung ist darin zu sehen, dass die Güte des Resonator-Schaltkreises basierend auf der Amplitude  
35 des Eingabe- oder Ausgabesignals eingestellt wird. Weist eines dieser Signale eine sehr hohe Amplitude auf, so kann mittels des Steuer-Schaltkreises die Güte des Resonator-

Schaltkreises derart stark verringert werden, dass das Signal stark gedämpft wird. Dagegen kann bei einem Signal einer geringen Amplitude die Güte derart erhöht werden, dass ein nur sehr schwach gedämpftes Signal an dem Ausgang der  
5 Schaltkreis-Anordnung bereitgestellt wird.

Anschaulich wird erfindungsgemäß zum Durchführen einer Dynamikkompression die Tatsache verwendet, dass ein Resonator-Schaltkreis nahe seiner Resonanzfrequenz als  
10 ausreichend stabiler Verstärker wirkt (Resonanzüberhöhung).

Unter der Güte eines Resonator-Schaltkreises wird insbesondere das Verhältnis einer Amplitude eines Ausgabesignals bei oder nahe der Resonanzfrequenz des  
15 Resonator-Schaltkreises zu der entsprechenden Amplitude bei einer von der Resonanzfrequenz stark unterschiedlichen Frequenz verstanden. Die Güte eines Resonator-Schaltkreises hängt von dessen ohmschen Widerstand ab, so dass die Güte beispielsweise mittels Steuerns oder Regelns des ohmschen  
20 Widerstands des Resonator-Schaltkreises einstellbar ist.

In einem Szenario, in dem die Güte des Resonator-Schaltkreises basierend auf der Amplitude des in den Resonator-Schaltkreis eingeführten Eingabesignals eingestellt  
25 wird, kann die Funktionalität des Steuer-Schaltkreises als ein "Steuern" bezeichnet werden. Wird dagegen die Güte des Steuer-Schaltkreises basierend auf der Amplitude des Ausgabesignals eingestellt, so erfüllt der Steuer-Schaltkreis eine "Regelungs"-Funktionalität, da er ein rückgekoppeltes  
30 Anpassen der Güte durchführt.

Mit der erfindungsgemäßen Schaltkreis-Anordnung ist eine sichere und effektive Dynamikkompression eines Eingabesignals im Zeitbereich ermöglicht, ohne dass die Nachteile einer  
35 Fourier-Transformation auftreten. Insbesondere entfallen die bei einer Fourier-Transformation gemäß dem Stand der Technik auftretenden Probleme mit einem endlichen Zeitfenster.

Darüber hinaus wird erfindungsgemäß ein dynamik komprimiertes Ausgangssignal generiert, das z.B. im Vergleich zu der Rücktransformation des logarithmierten Fourierspektrums deutlich geringere störende Signalverzerrung aufweist.

5

Gemäß der Erfindung ist eine ausreichend starke und intensitätsselektive (z.B. nichtlineare) Dämpfung eines Eingabesignals mittels selektiven Verringerens der Güte des Resonator-Schaltkreises ermöglicht.

10

Anschaulich kann die Schaltkreis-Anordnung als Filter-Schaltkreis aufgefasst werden, wobei basierend auf dem Wert der Induktivität  $L$  und der Kapazität  $C$  des Resonator-Schaltkreises der Frequenzbereich festgelegt ist, für welchen der Resonator-Schaltkreis durchlässig ist. Somit ist mittels Einstellens der Werte  $L$ ,  $C$  eine einfache Möglichkeit geschaffen, den Frequenz-Schwerpunkt des transmittierbaren Intervalls des Resonator-Schaltkreises einzustellen. Die Breite der Resonanzkurve des Resonator-Schaltkreises ist insbesondere mittels Einstellens seiner Güte justierbar. Der Resonator-Schaltkreis in seiner erfindungsgemäßen Verschaltung kann als Filter mit nichtlinearer Dämpfung angesehen werden, mit dem eine im Prinzip beliebig hohe Dynamikkompression erreicht werden kann. Aufgrund einer ausreichend schmalbandigen Verarbeitung können auch Verzerrungen, die durch eine zu starke Nichtlinearität entstehen können, ausreichend gering gehalten werden.

15

20

25

30

35

Die Schaltkreis-Anordnung als Filter kann einen Resonator-Schaltkreis zweiter Ordnung enthalten, wobei die Dämpfung nichtlinear mit steigendem Schallpegel ansteigt. Bei einer passiven Realisierung der Schaltkreis-Anordnung, das heißt bei einer Verwendung passiver Bauelemente (Spule  $L$ , Kondensator  $C$ , ohmscher Widerstand  $R$ ) kann eine stabile Schaltung erhalten werden (im Gegensatz zu Systemen, die einen aktiven, rückgekoppelten Verstärker benötigen).

Anstelle einer schnellen Fourier-Transformation (FFT) wird erfindungsgemäß eine, beispielsweise analoger, Filterbank verwendet, anstelle einer Logarithmierung wird eine nichtlineare Dämpfung eines Eingangssignals basierend auf dem Schallpegel eines Signals durchgeführt.

Bevorzugte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Der Resonator-Schaltkreis kann einen mittels des Steuer-Schaltkreises steuerbaren (bzw. regelbaren) ohmschen Widerstand aufweisen. Ein solcher steuerbarer oder regelbarer ohmscher Widerstand ist eine einfache Schaltkreis-Komponente, mittels welcher die Funktionalität des Regels der Güte des Resonator-Schaltkreises mit geringem Aufwand und genau und stabil erfüllt werden kann.

Das Eingangssignal kann zwischen einem ersten Anschluss des ohmschen Widerstands und einem ersten Anschluss der Kapazität bereitgestellt sein. Das Ausgangssignal kann zwischen dem ersten Anschluss der Kapazität und einem zweiten Anschluss der Kapazität bereitgestellt sein. Ein zweiter Anschluss des ohmschen Widerstands kann mit einem ersten Anschluss der Induktivität und ein zweiter Anschluss der Induktivität kann mit einem zweiten Anschluss der Kapazität gekoppelt sein.

Der Steuer-Schaltkreis kann derart eingerichtet sein, dass er die Güte des Resonator-Schaltkreises basierend auf einer Boltzmann-Funktion steuert, in welcher die Amplitude des Ausgangssignals als Parameter enthalten ist. Eine Boltzmann-Funktion ist bei geeigneter Wahl der darin enthaltenen Parameter gut geeignet, die Empfindlichkeitskurve der äußeren Haarsinneszellen im menschlichen Innenohr anzunähern. Eine besonders gute Beschreibung dieser biologischen Abhängigkeit kann durch eine Boltzmann-Funktion zweiter Ordnung beschrieben werden. Dadurch ist es möglich, die Empfindlichkeitskurve im menschlichen Ohr anzunähern, was für

Anwendungen der Schaltkreis-Anordnung im medizinischen Bereich (beispielsweise für ein Hörgerät) vorteilhaft ist.

Der Steuer-Schaltkreis kann derart eingerichtet sein, dass er  
5 die Güte des Resonator-Schaltkreises in Abhängigkeit von der  
Amplitude des Ausgabesignals basierend auf einer für ein Ohr  
eines Menschen ermittelten Empfindlichkeitscharakteristik  
einstellt. Um die Empfindlichkeitscharakteristik im Innenohr  
eines Menschen besonders gut mittels einer erfindungsgemäßen  
10 Schaltkreis-Anordnung nachzubilden, kann eine beispielsweise  
experimentell oder theoretisch ermittelte  
Empfindlichkeitscharakteristik des menschlichen Ohrs in der  
Form einer Datei oder Tabelle für den Steuer-Schaltkreis  
zugänglich abgelegt sein. In diesem Fall kann der Steuer-  
15 Schaltkreis die Güte des Resonator-Schaltkreises derart  
steuern oder regeln, dass die darin abgelegte biologische  
Empfindlichkeitscharakteristik angenähert wird.

Der Steuer-Schaltkreis kann derart eingerichtet sein, dass er  
20 die Güte des Resonator-Schaltkreises umso geringer einstellt,  
je höher die Amplitude des Ausgabesignals ist.

Der Steuer-Schaltkreis kann ferner derart eingerichtet sein,  
dass er die Güte des Resonator-Schaltkreises in einer  
25 nichtlinearen Abhängigkeit von der Amplitude des  
Ausgabesignals einstellt. D.h., dass Signalbereiche großer  
Amplitude überproportional stark gegenüber Signalbereichen  
kleiner Amplitude gedämpft werden. Somit kann auch bei einem  
extrem hohen Bereich von Schallpegeln in einem Eingabesignal  
30 eine Komprimierung auf einen ausreichend schmalen Bereich bei  
dem Ausgabesignal erreicht werden.

Der Steuer-Schaltkreis kann derart eingerichtet sein, dass er  
die Güte des Resonator-Schaltkreises derart einstellt, dass  
35 die Amplitude des Ausgabesignals innerhalb eines  
vorbestimmten Intervalls ist. Für bestimmte Anwendungen kann  
es vorteilhaft sein, die Amplitude eines Ausgabesignals auf

jeden Fall innerhalb eines vorbestimmten Intervalls zu halten. Dies kann beispielsweise im Rahmen der Datenkomprimierung wichtig sein, wenn ein Signal mit einer hohen Intensitätsschwankung mit möglichst wenig

5 Quantisierungsstufen erfasst werden soll. In diesem Fall kann der Steuer-Schaltkreis derart eingerichtet sein, dass er die Güte des Resonator-Schaltkreises derart steuert oder regelt, dass das Ausgabesignal innerhalb des vorbestimmten Intervalls liegt.

10

Die Schaltkreis-Anordnung kann eine Mehrzahl von in Serie geschalteten Resonator-Schaltkreisen aufweisen, wobei ein Ausgabesignal eines jeweils vorgeschalteten Resonator-Schaltkreises den ihm jeweils nachgeschalteten Resonator-Schaltkreis als Eingabesignal bereitstellbar ist.

15

Gemäß dieser besonders vorteilhaften Ausgestaltung ist anschaulich eine Filterbank mit einer Hintereinander-Schaltung aus mehreren Resonator-Schaltkreisen geschaffen, wodurch die Dynamikkompression auf einen noch größeren Dynamikbereich ausgeweitet werden kann. Im Prinzip kann eine ausreichend starke Dynamikkompression (z.B. 60dB) bereits mit einer Filterstufe (d.h. mit einem Resonator-Schaltkreis) mit einer sehr hohen Güte  $Q$  (z.B.  $Q=1000$ , die bei hohen Pegeln auf eine Güte von  $Q=1$  reduziert wird) erfolgen. Eine solche Schaltkreis-Anordnung ist allerdings sehr schmalbandig (beispielsweise 0.1% der Resonanzfrequenz des Resonator-Schaltkreises). Mittels Kaskadierens mehrerer Filter (z.B. drei hintereinander geschaltete Filter) mit einer relativ geringen Güte  $Q$  (z.B.  $Q=10$ , so dass  $Q^3=1000$ ) lässt sich gemäß der Erfindung ebenfalls eine ausreichend starke Dynamikkompression (z.B. von 60dB) realisieren. Die nicht zu hohen Einzel-Güte von jedem dieser Filter bringt den vorteilhaften Effekt mit sich, dass aufgrund der aus der geringeren Güte resultierenden erhöhten Bandbreite der einzelnen Filter ein größerer Frequenzbereich der Filter abgedeckt wird und gleichzeitig das Impulsverhalten der

35



Filter verbessert wird, d.h. die Ein- und Ausschwingzeit des Systems ist wesentlich geringer.

Die hintereinander geschalteten Resonator-Schaltkreise können  
5 anschaulich miteinander direkt verkoppelt sein derart, dass  
die Ausgabespannung eines vorgeschalteten Resonator-  
Schaltkreises gleich der Eingabespannung des ihm  
nachgeschalteten Resonator-Schaltkreises ist und dass der (im  
Betrieb in der Regel von Null verschiedene) Ausgabestrom  
10 eines vorgeschalteten Resonator-Schaltkreises gleich dem  
Eingabestrom des ihm nachgeschalteten Resonator-Schaltkreises  
ist. Hierfür ist die Schaltkreis-Anordnung in der Regel von  
einem Zwischenelement zwischen vor- und nachgeschaltetem  
Resonator-Schaltkreisen frei. Dies ist mittels einer  
15 Schaltkreis-Anordnung realisierbar, bei welcher der zweite  
Anschluss der Spule eines vorgeschalteten Resonator-  
Schaltkreises mit dem ersten Anschluss des ohmschen  
Widerstands des dem vorgeschalteten Resonator-Schaltkreis  
nachgeschalteten Resonator-Schaltkreises gekoppelt ist.

20

Alternativ können die hintereinander geschalteten Resonator-  
Schaltkreise anschaulich von einer unmittelbaren Kopplung  
frei sein, d.h. voneinander in gewisser Weise entkoppelt  
sein, insbesondere unter Zwischenschalten eines  
25 Zwischenelements zwischen Ausgabe eines vorgeschalteten und  
Eingabe eines nachgeschalteten Resonator-Schaltkreises. Dies  
ist vorzugsweise derart realisiert, dass die Ausgabespannung  
eines vorgeschalteten Resonator-Schaltkreises gleich der  
Eingabespannung des ihm nachgeschalteten Resonator-  
30 Schaltkreises ist und dass der Ausgabestrom eines  
vorgeschalteten Resonator-Schaltkreises gleich Null ist. Der  
Eingabestrom des nachgeschalteten Resonator-Schaltkreises  
ergibt sich im Wesentlichen nur aus der Impedanz des dieses  
Resonator-Schaltkreises. Bei einer derartigen Schaltkreis-  
35 Anordnung ist als Zwischenelement vorzugsweise ein  
Operationsverstärker (als Impedanzwandler) zwischen einem  
vorgeschalteten Resonator-Schaltkreis und dem ihm

nachgeschalteten Resonator-Schaltkreis vorgesehen. Ein erster Eingang des Operationsverstärkers ist mit dem zweiten Anschluss der Spule des vorgeschalteten Resonator-Schaltkreises gekoppelt. Ein zweiter Eingang des Operationsverstärkers ist mit einem Ausgang des Operationsverstärkers rückgekoppelt und ist mit dem ersten Anschluss des ohmschen Widerstands des dem vorgeschalteten Resonator-Schaltkreis nachgeschalteten Resonator-Schaltkreises gekoppelt.

10

Zur Reduktion der Rechenleistung kann die Güte aller in Serie geschalteter Resonator-Schaltkreise identisch eingestellt sein. In diesem Fall ist die von dem Steuer-Schaltkreis beanspruchte Rechenleistung besonders gering gehalten, da für alle Resonator-Schaltkreise eine gemeinsame Güte ermittelt und eingestellt wird, d.h. alle Filterparameter identisch sind. Wird eine Schaltkreis-Anordnung mit einer besonders hohen Qualitätsanforderung benötigt, so kann alternativ die Güte von unterschiedlichen in Serie geschalteten Resonator-Schaltkreisen zum Zwecke einer Optimierung unterschiedlich eingestellt werden. Bei einer solchen Schaltkreis-Anordnung ist somit die Güte von jedem der in Serie geschalteten Resonator-Schaltkreise individuell eingestellt.

Die Schaltkreis-Anordnung weist vorzugsweise eine Mehrzahl von parallel geschalteten Zweigen auf, wobei jeder Zweig einen Resonator-Schaltkreis oder mehrere in Serie geschaltete Resonator-Schaltkreise aufweist. In diesem Fall ist die Güte eines jeweiligen Resonator-Schaltkreises mittels des Steuer-Schaltkreises steuerbar bzw. regelbar.

Gemäß dieser besonders vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung sind anschaulich mehrere parallel geschaltete Zweige von Resonator-Schaltkreisen vorgesehen, wobei in jedem Zweig eine Mehrzahl von Resonator-Schaltkreisen hintereinandergeschaltet sein kann.

Vorzugsweise ist der mindestens eine Resonator-Schaltkreis eines jeweiligen Zweigs derart eingerichtet, dass er für einen jeweiligen Frequenzbereich des Eingabesignals durchlässig ist derart, dass die Zweige gemeinsam für ein zusammenhängendes Frequenzintervall durchlässig sind. Der Frequenzbereich, für den das menschliche Gehör sensitiv ist, liegt ungefähr zwischen 20Hz und 20kHz. Um diesen Hörfrequenzbereich abzudecken, sind in der parallelen

Anordnung von Resonator-Schaltkreisen in unterschiedlichen Kanälen die Frequenzbereiche transmittierbarer Signale in der Regel unterschiedlich. Der Frequenzbereich transmittierbarer Signale in einem Resonator-Schaltkreis ist eine Verteilungskurve um die Resonanzfrequenz herum mit einer gewissen Halbwertsbreite. Die Resonanzfrequenz ist

anschaulich mittels Einstellens der Werte L, C des Resonator-Schaltkreises möglich, die Halbwertsbreite ist mittels Einstellens der jeweiligen Güte justierbar. Setzt man die unterschiedlichen Frequenz-Durchlassbereiche der unterschiedlichen Zweige von Resonator-Schaltkreisen

zusammen, so ergibt sich ein vorzugsweise zusammenhängendes Frequenzintervall, mittels welchem der Sensitivitätsbereich des menschlichen Gehörs oder ein sonstiger Frequenzbereich von Interesse erfassbar ist.

Vorzugsweise sind die Frequenzbereiche, für die unterschiedliche Zweige durchlässig sind, zumindest teilweise einander überlappend. In diesem Fall ist sichergestellt, dass alle Frequenzen erfasst werden, und es ist ein Zusammensetzen der Signalkomponenten einzelner Zweige möglich.

Vorzugsweise ist der Frequenzbereich, für den ein jeweiliger Zweig durchlässig ist, mittels Einstellens des Werts der Kapazität und/oder der Induktivität des mindestens einen Resonator-Schaltkreises des Zweigs vorgebar. Dies beruht darauf, dass die Resonanzfrequenz eines Resonator-Schaltkreises von den Werten der Induktivität und der Kapazität abhängt.

Vorzugsweise ist die Schaltkreis-Anordnung der Erfindung zum Verarbeiten eines akustischen Signals als Eingabesignal eingerichtet. In diesem Fall eignet sich die Schaltkreis-  
5 Anordnung der Erfindung für einen Einsatz in einem Sprachverarbeitungs-System. Ein solches kann beispielsweise auf pulsenden neuronalen Netzwerken beruhen, welche auf eine Reduktion des Dynamikbereichs angewiesen sind. Weitere Anwendungsgebiete sind Systeme zur Schallverarbeitung und  
10 (Audio-)Datenkomprimierung, wenn Signale mit hohen Amplituden mit möglichst wenig Quantisierungsstufen erfasst werden sollen. Darüber hinaus gibt es Anwendungen im medizinischen Bereich, insbesondere als Hörhilfe bei Patienten mit Lärm-Schwerhörigkeit.

15 Die erfindungsgemäße Schaltkreis-Anordnung kann in digitaler oder analoger Schaltungstechnik realisiert sein.

Zumindest ein Teil der Schaltkreis-Anordnung, insbesondere  
20 die Filter, die Steuer- oder Regelungs-Funktionalität des Steuer-Schaltkreises, kann als Computerprogramm realisiert sein. Die Erfindung kann sowohl mittels eines Computerprogramms, d.h. einer Software, als auch mittels einer oder mehrerer spezieller elektrischer Schaltungen, d.h.  
25 in Hardware oder in beliebig hybrider Form, d.h. mittels Software-Komponenten und Hardware-Komponenten, realisiert werden.

Eine Software-Realisierung insbesondere des Steuer-  
30 Schaltkreises kann beispielsweise in "C++" erfolgen. Eine Realisierung kann auf einem beliebigen Prozessor oder DSP (digitaler Signalprozessor) erfolgen, ebenso auf einem FPGA-Baustein. Ein FPGA ("Field Programmable Gate Array") ist ein integrierter programmierbarer Schaltkreis, der in der Regel  
35 eine Vielzahl programmierbarer Zellen auf einem Chip aufweist.

Im Weiteren wird die erfindungsgemäße Signalverarbeitungs-Vorrichtung, die eine erfindungsgemäße Schaltkreis-Anordnung aufweist, näher beschrieben. Ausgestaltungen der Signalverarbeitungs-Vorrichtung gelten auch für die  
5 Schaltkreis-Anordnung und umgekehrt.

Bei der Signalverarbeitungs-Vorrichtung kann die Weiterverarbeitungs-Einheit eine Spracherkennungs-Einrichtung oder ein Hörgerät sein.

10

Bei einer Realisierung der Weiterverarbeitungs-Einheit als Hörgerät kommt insbesondere eine Anwendung in Frage, bei der eine Dynamikkompression zum Ausgleich von Störungen der Lautstärke-Wahrnehmung von Schwerhörigen durchgeführt wird.

15 Im gestörten Gehör können die äußeren Haarzellen in Mitleidenschaft gezogen sein, wodurch die Erhöhung der Empfindlichkeit bei niedrigen Schallpegeln ausfällt. Das Gehör arbeitet dann anschaulich stets mit der für hohe Schallpegel vorgesehenen Empfindlichkeit. Dieses führt dazu,  
20 dass der nutzbare Bereich an Schallpegeln zwischen der Hörschwelle (sehr leise) und der Unannehmlichkeits-Schwelle (sehr laut) kleiner wird (Recruitment). Zum Ausgleich dieses Phänomens kann mittels der erfindungsgemäßen Schaltkreis-Anordnung der Signalverarbeitungs-Vorrichtung eine  
25 Dynamikkompression durchgeführt werden, die den großen Schallpegelbereich der akustischen Umwelt auf den wahrzunehmenden Bereich des Patienten anschaulich zusammendrückt.

30 Die Signalverarbeitungs-Vorrichtung kann auch den Eingang für ein Spracherkennungssystem bilden, insbesondere in pulsender neuronaler Netzwerk Architektur.

Die Signalverarbeitungs-Vorrichtung kann als analoge- oder  
35 digitale Filterbank eingerichtet sein.

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Figuren dargestellt und werden im Weiteren näher erläutert.

Es zeigen:

5

Figur 1 eine Schaltkreis-Anordnung gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

10

Figur 2 einen Resonator-Schaltkreis gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Figur 3 eine Realisierung des in Figur 2 gezeigten Resonator-Schaltkreises als Wellendigitalfilter,

15

Figuren 4 und 5 Diagramme zum Veranschaulichen der Funktionalität der erfindungsgemäßen Schaltkreis-Anordnung,

20

Figur 6A eine Schaltkreis-Anordnung gemäß einem anderen bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Figur 6B eine Realisierung der in Figur 6A gezeigten Resonator-Schaltkreise als Wellendigitalfilter,

25

Figur 7A eine Schaltkreis-Anordnung gemäß einem weiteren bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Figur 7B eine Realisierung der in Figur 7A gezeigten Resonator-Schaltkreise als Wellendigitalfilter.

30

Gleiche oder ähnliche Komponente in unterschiedlichen Figuren sind mit gleichen Bezugsziffern versehen.

35

Im Weiteren wird bezugnehmend auf **Fig.1** eine Schaltkreis-Anordnung 100 gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung beschrieben.

Die Schaltkreis-Anordnung 100 enthält eine Vielzahl von Resonator-Schaltkreisen 101, von denen jeder eine Kapazität und eine Induktivität aufweist (nicht gezeigt in Fig.1), sowie einen Eingang, an dem ein Eingangssignal bereitstellbar ist und einen Ausgang, an dem ein Ausgangssignal bereitstellbar ist. Jeweils drei der Resonator-Schaltkreise 101 sind entlang einer jeweiligen Zeile der matrixförmigen Anordnung hintereinander geschaltet, so dass ein jeweiliger Ausgang eines vorgeschalteten Resonator-Schaltkreises 101 mit einem jeweiligen Eingang eines ihm nachgeschalteten Resonator-Schaltkreises 101 gekoppelt ist. Die Werte der Induktivität und der Kapazität der Resonator-Schaltkreise 101 einer Zeile sind jeweils derart gewählt, dass die jeweilige Zeile ein Signal eines entsprechenden Frequenzintervalls in einem Umgebungsbereich der Resonanzfrequenz der Resonator-Schaltkreise 101 der Zeile transmittieren kann. Die Resonator-Schaltkreise 101 unterschiedlicher Zeilen weisen jeweils unterschiedliche Werte für L, C auf, sodass zusammengenommen die einzelnen Zeilen oder Zweige von Resonator-Schaltkreisen 101 ein zusammenhängendes Frequenz-Intervall abdecken, welches dem Empfindlichkeitsbereich des menschlichen Gehörs entspricht (ungefähr 20Hz bis 20kHz).

Ein Steuer-Schaltkreis 111 steht mit allen Resonator-Schaltkreisen 101 in einer Kommunikationsverbindung, d.h. der Steuer-Schaltkreis 111 ist mit allen Resonator-Schaltkreisen gekoppelt. Die Güte von jedem einzelnen der Resonator-Schaltkreise 101 ist mittels des Steuer-Schaltkreises 111 zum Steuern oder Regeln der Güte der Resonator-Schaltkreise 101 einstellbar, wobei der Steuer-Schaltkreis 111 derart eingerichtet ist, dass er die Güte der Resonator-Schaltkreise 101 abhängig von der Amplitude eines Ausgangssignals des letzten Resonator-Schaltkreises 101 einer jeweiligen Zeile einstellt. Beispielsweise wird die Güte der Resonator-Schaltkreise  $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{13}$  mittels des Steuer-Schaltkreises 111 basierend auf der Amplitude eines Signals am Ausgang des Resonator-Schaltkreises  $R_{13}$  eingestellt.

In Fig.1 ist ferner eine Schallquelle 103 gezeigt, welche ein akustisches Signal als globales Eingangssignal 102 emittiert. Dieses wird den Eingängen der Resonator-Schaltkreise 101

5  $(R_{11}, R_{21}, \dots, R_{k1}, \dots, R_{n1})$  der ersten Spalte von Resonator-Schaltkreisen 101 bereitgestellt.

Im Weiteren wird der in der ersten Zeile und der ersten Spalte von Resonator-Schaltkreisen angeordnete Resonator-Schaltkreis 101  $R_{11}$  betrachtet. Diesem wird an einem Eingang das globale Eingangssignal 102 der Schallquelle 103 bereitgestellt. Der Resonator-Schaltkreis 101  $R_{11}$  lässt eine von den ihm zugeordneten Werten  $L$  und  $C$  abhängige Frequenzkomponente des globalen Eingangssignals 102 hindurch,

15 welche an einem Ausgang des Resonator-Schaltkreises  $R_{11}$  als erstes lokales Ausgabesignal 104 bereitgestellt ist. Ferner wird aufgrund der Funktionalität des Resonator-Schaltkreises 101  $R_{11}$  abhängig von seiner (gegenwärtigen) Güte  $Q$  das globale Eingangssignal 102 in seiner Amplitude verändert. Die Güte  $Q$  des Resonator-Schaltkreises 101  $R_{11}$  wird mittels eines ohmschen Widerstands (nicht gezeigt in Fig.1) des Resonator-Schaltkreises 101  $R_{11}$  geregelt, wobei der Steuer-Schaltkreis 111 diesem regelbaren ohmschen Widerstand ein entsprechendes Steuersignal bereitstellt, wodurch der Widerstand auf einen

25 vorbestimmten Wert eingestellt wird. Dadurch wird die Güte des Resonator-Schaltkreises 101 eingestellt, so dass in einem nachfolgenden Verarbeitungs-Zyklus gemäß diesem Wert der Güte ein Eingangssignal stärker oder schwächer gedämpft wird. Da die Schaltkreis-Anordnung 100 zur Dynamikkompression des globalen Eingangssignals 102 eingerichtet ist, werden

30 anschaulich Signalbereiche hoher Amplitude stärker geschwächt als Signalbereiche geringer Amplitude.

Das erste lokale Ausgabesignal 104 wird dem dem Resonator-Schaltkreis 101  $R_{11}$  nachgeschalteten Resonator-Schaltkreis 101  $R_{12}$  als erstes lokales Eingangssignal 105 bereitgestellt. Das erste lokale Eingangssignal 105 durchläuft den Resonator-

35



Schaltkreis 101  $R_{12}$ , wobei an einem Ausgang das zweite lokale Ausgabesignal 106 bereitgestellt wird. Das zweite lokale Ausgabesignal 106 dient als zweites lokales Eingabesignal 107 des dem Resonator-Schaltkreis 101  $R_{12}$  nachgeschalteten Resonator-Schaltkreises 101  $R_{13}$ . An dessen Ausgang 108 ist ein drittes lokales Ausgabesignal 108 bereitgestellt. Dieses wird gemeinsam mit den jeweils auf ein separates Frequenzintervall bezogenen Ausgabesignalen der jeweils letzten in einer Zeile angeordneten Resonator-Schaltkreisen 101 ( $R_{13}$ ,  $R_{23}$ , ...,  $R_{k3}$ , ...,  $R_{n3}$ ) zu einem globalen Ausgabesignal 109 zusammengesetzt (addiert).

Bei jedem der Resonator-Schaltkreise 101 einer jeweiligen Zeile von Resonator-Schaltkreisen ( $R_{k1}$ ,  $R_{k2}$ ,  $R_{k3}$ ) wird die Güte aller Resonator-Schaltkreise 101 der Zeile basierend auf der Amplitude des Ausgabesignals an dem Ausgang des jeweils letzten Resonator-Schaltkreises (in der k-ten Zeile Resonator-Schaltkreis  $R_{k3}$ ) mittels des Steuer-Schaltkreises 111 geregelt.

Das zusammengesetzte globale Ausgabesignal 109 ist somit gegenüber dem globalen Eingabesignal 102 einer Dynamikkompression unterzogen.

Im Weiteren wird bezugnehmend auf **Fig.2** der Resonator-Schaltkreis 101 aus Fig.1 beschrieben.

In Fig.2 ist ein Eingabesignal 200 als Spannungsquelle  $U$  symbolisiert. Ferner ist ein Ausgabesignal 204 als Spannung  $U_c$  symbolisiert. Das Eingabesignal 200 ist zwischen einem ersten Anschluss eines ohmschen Widerstands 203 und einem ersten Anschluss einer Kapazität 201 bereitgestellt. Das Ausgabesignal 204 ist zwischen dem ersten Anschluss der Kapazität 201 und einem zweiten Anschluss der Kapazität 201 bereitgestellt. Ferner ist ein zweiter Anschluss des regelbaren ohmschen Widerstands 203 mit einem ersten Anschluss einer Induktivität 202 gekoppelt, und ein zweiter

Anschluss der Induktivität 202 ist mit dem zweiten Anschluss der Kapazität 201 gekoppelt.

Der Wert des ohmschen Widerstands R 203 ist mittels des Steuer-Schaltkreises 111 einstellbar. Der Resonator-Schaltkreis 101 aus Fig.2 stellt somit anschaulich einen Filter mit regelbarer Dämpfung dar.

Bei der erfindungsgemäßen Schaltkreis-Anordnung 100 sind in jeder Zeile drei (oder allgemein N) Resonator-Schaltkreise 101 als Filterelemente rückkopplungsfrei hintereinander geschaltet. Das zeitabhängige Ausgabesignal  $U_c(t)$ , wobei t die Zeit ist, eines vorgeschalteten Filters definiert jeweils das Eingangssignal U 200 des dem vorgeschalteten Filter nachgeschalteten Filters.

Der Widerstand R 203 kann in nichtlinearer Abhängigkeit von der Ausgangsspannung  $U_c(t)$  verändert werden (Regelung), in Abhängigkeit von  $U_c(t)$  des jeweils vorangeschalteten Filters (Steuerung), oder auch in für alle Filter gleichzeitig in Abhängigkeit von  $U_c(t)$  der letzten Filterstufe einer Reihe.

Im Weiteren wird beschrieben, auf Basis welcher Rechenvorschrift gemäß dem beschriebenen Ausführungsbeispiel der Wert R eines jeweiligen ohmschen Widerstands R 203 eingestellt wird.

Hierfür wird zunächst eine einzustellende Güte Q berechnet.

Gemäß dem beschriebenen Ausführungsbeispiel wird die Güte Q des Filters gemäß einer Boltzmann-Funktion gedämpft:

$$Q(t) = (Q_0 - Q_{\min}) \left( 1 - \left[ \frac{2}{1 + \exp\{-SAT | U_c(t) | \}} - 1 \right] \right) + Q_{\min} \quad (1)$$

In Gleichung (1) ist Q(t) die Abhängigkeit der Güte Q von der Zeit t.  $Q_0$  ist eine vorgebbare Maximalgüte des Resonator-

Schaltkreises 101 (z.B.  $Q_0=10$ ).  $Q_{\min}$  ist eine vorgebbare minimale Güte des Resonator-Schaltkreises (z.B.  $Q_{\min}=1$ ). SAT ist eine vorgebbare Sättigungsschwelle, das heißt ein Parameter, mit dem anschaulich die Zeitabhängigkeit der Güte  
5 eingestellt werden kann (z.B. SAT=1).

Die Boltzmann-Funktion (1) nähert die Empfindlichkeitskurve der äußeren Haarsinneszellen im Innenohr an. Die Funktion kann bei Bedarf durch eine Boltzmann-Funktion zweiter Ordnung  
10 ersetzt werden, die unter Einführung eines weiteren Parameters eine noch genauere Anpassung ermöglicht. In Gleichung (1) ist eine einfache Boltzmann-Funktion erster Ordnung verwendet, da sie nur einen freien Parameter (nämlich SAT) aufweist und somit mit geringem numerischen Aufwand  
15 verarbeitet werden kann.

Aus der Güte  $Q$  des Filters berechnet sich der einzustellende Wert des nichtlinearen Widerstands  $R$  zu:

$$20 \quad R(t) = \sqrt{L/C} Q(t) \quad (2)$$

Somit hängt der zeitabhängige Wert des ohmschen Widerstands  $R(t)$  von dem Wert der Induktivität  $L$  und der Kapazität  $C$  sowie der zeitabhängigen Güte  $Q(t)$  ab.

25  
Anschaulich bilden Gleichungen (1) und (2) die Regelungsvorschrift für das Einstellen des Werts  $R$  des ohmschen Widerstands 203 mittels des Steuer-Schaltkreises 111.

30  
Der von dem in Fig.2 gezeigten Resonator-Schaltkreis 101 gebildete Filter ist bei sehr geringen Amplituden  $U_c(t)$  linear (mit  $Q \rightarrow Q_0$  für  $U_c(t) \rightarrow 0$ ). Ebenso ist er bei sehr großen Amplituden  $U_c(t)$  näherungsweise linear ( $Q \rightarrow Q_{\min}$  für  $U_c(t) \rightarrow \infty$ ).  
35 Die Dynamikkompression  $K$  erfolgt im Bereich der Sättigungsschwelle (SAT) und beträgt  $K=Q_0/Q_{\min}$ . Im Falle von  $N=4$  hintereinander geschalteten Filterstufen (in Fig.1 sind

allerdings nur drei Filterstufen mittels dreier Resonator-Schaltkreise in einer Zeile vorgesehen) und den Werten  $Q_0=10$  und  $Q_{\min}=1$  ist eine starke Kompression um 80dB ( $K_N=(Q_0/Q_{\min})^N$ ) realisierbar.

5

Um den gesamten Hörbereich des Menschen abzudecken, wird eine Filterbank mit Resonanzfrequenzen im Bereich von ungefähr 20Hz bis ungefähr 20kHz realisiert, was durch typischerweise fünfzig bis hundert Zeilen von Resonator-Schaltkreisen 101 (d.h.  $n=50$  bis  $n=100$ ) realisiert wird. Gemäß dem beschriebenen Ausführungsbeispiel wird der Wert der Induktivität auf  $L=1H$  festgelegt. Der jeweilige Wert  $C$  wird dann für jede Zeile von Resonator-Schaltkreisen 101 gemäß der von dieser Zeile abgedeckten Filterfrequenz  $f_0$  aus der Resonanzfrequenz des entsprechenden LC-Glieds berechnet:

10

15

$$C=(4\pi^2f^2L)^{-1} \quad (3)$$

20

25

Es ist anzumerken, dass die nichtlineare Güte  $Q$  für jede Filterfrequenz  $f_0$ , d.h. für jede Zeile von Resonator-Schaltkreisen 101, unabhängig berechnet wird. Bezugnehmend auf Fig.1 bedeutet dies, dass jeder Zeile von Oszillator-Schaltkreisen 101 eine entsprechende Filterfrequenz  $f_0$  zugeordnet ist, für welche der Wert der Güte  $Q(t)$  berechnet wird.

30

Im Weiteren wird bezugnehmend auf Fig.3 ein Wellendigitalfilter 300 als Realisierung der in Fig.2 gezeigten Resonatorstufe 101 beschrieben.

35

Ein Wellendigitalfilter stellt eine Klasse von Digitalfiltern mit besonders günstigen Eigenschaften dar. Sie sind traditionellen Filtern aus den klassischen Bauelementen der Nachrichtentechnik nachgebildet und werden mit Hilfe moderner integrierter Digitalschaltungen betrieben. Gemäß der Technologie eines Wellendigitalfilters kann anschaulich ein

analoges Modell digital realisiert werden (beispielsweise unter Verwendung eines Computers).

Im Weiteren werden anschaulich die Komponenten des Wellendigitalfilters 300 aus Fig.3 den Komponenten des Resonator-Schaltkreises 101 aus Fig.2 anschaulich zugeordnet und die entsprechenden Größen definiert.

Ein erster Block 301 des Wellendigitalfilters 300 enthält einen reflexionsfreien seriellen Koppler mit den Impedanzen R11 und R13. Anschaulich repräsentiert R11 den regelbaren ohmschen Widerstand R 203, bezogen auf einen Referenzwiderstand. R12 repräsentiert einen korrigierten Widerstand (Impedanz) der Spule L 202 bezogen auf eine Basisfrequenz. Ein zweiter Block 302 enthält einen parallelen Koppler, der die parallele Verschaltung der Kapazität 201 wiedergibt, wobei in dem zweiten Block die Leitwerte G21, G22, G23 dargestellt sind. G21 ist ein Eingangs-Leitwert des zweiten Blocks ( $G_{12}=1/R_{13}$ ) 302, G23 ist ein Ausgangs-Leitwert des zweiten Blocks 302. Mittels des Leitwerts G22 wird der Widerstand der Kapazität C 201 modelliert. Ein dritter Block 303 repräsentiert einen Speicher bzw. ein Filterregister für die Kapazität 201 und ein vierter Block 304 repräsentiert einen Speicher bzw. ein Filterregister für die Spule 202.

Im Weiteren werden die in Fig.3 gezeigten Variablen definiert. Es ergeben sich die Widerstände und Leitwerte für jede Filterfrequenz zu:

$$R_{11}=R/R_B \quad (4)$$

$$R_{12}=2\pi F_B L / (R_B \tan[\pi F_B/f_s]) \quad (5)$$

$$R_{13}=R_{11}+R_{12} \quad (6)$$

$$G_{21}=R_{13}^{-1} \quad (7)$$

22

$$G22=2\pi F\_B C R\_B/\tan(\pi F\_B/f\_s) \quad (8)$$

$$G23=G21+G22 \quad (9)$$

5 Hierbei ist R der ohmsche Widerstand 203 und R\_B ein vorgebbarer Bezugswiderstand. F\_B ist eine vorgebbare Bezugsfrequenz. Die Werte R\_B und F\_B dienen zum Skalieren. Da die Realisation gemäß dem beschriebenen Ausführungsbeispiel mit Double Precision Float-Variablen  
10 realisiert ist, ist diese Normierung nicht relevant, wohl aber, wenn Integer-Arithmetik verwendet wird. L ist die Induktivität der Spule 202. Der Wert f\_s ist eine Sampling-Frequenz des abgetasteten Zeitsignals. Die Größen R11, R12, R13 sind ohmsche Widerstände, wohingegen die Größen G21, G22  
15 und G23 Leitwerte, das heißt inverse ohmsche Widerstände sind.

Filter-Koeffizienten g1, g2 ergeben sich zu:

$$20 \quad g1=R11/R13 \quad (10)$$

$$g2=G21/G23 \quad (11)$$

Die Anfangswerte der Filterregister Z1 (vierter Block 304)  
25 und Z2 (dritter Block 303) werden zu Null initialisiert.

Die Signale an den einzelnen Ports lassen sich sukzessive berechnen. Für die "Vorwärtswelle" des Signals, das heißt anschaulich die Koeffizienten an den gemäß Fig.3 nach rechts  
30 orientierten Pfeile, ergibt sich:

$$b13=-(U+Z1) \quad (12)$$

$$b20=-g2(Z2-b13) \quad (13)$$

35

$$b23=b20+Z2 \quad (14)$$

23

Die Größe U in Gleichung (12) ist das Eingangssignal 200.

Für die "Rückwärtswelle", das heißt anschaulich die gemäß Fig.3 nach links orientierten Pfeile, ergeben sich die

5 Koeffizienten:

$$b_{22}=b_{20}+b_{23} \quad (15)$$

$$b_{21}=b_{22}+z_2-b_{13} \quad (16)$$

10

$$a_0=b_{21}-b_{13} \quad (17)$$

$$b_{11}=U-g_1 a_0 \quad (18)$$

15

$$b_{12}=- (b_{11}+b_{21}) \quad (19)$$

Das Ausgabesignal  $U_c$  204 berechnet sich dann zu:

$$U_c=(b_{22}+z_2[\text{sec}])/2 \quad (20)$$

20

Die Filterregister (Blöcke 303, 304) werden wie folgt aktualisiert:

$$z_1=-b_{12} \quad (21)$$

25

$$z_2=b_{22} \quad (22)$$

Das Ausgabesignal  $U_c$  204 wird als Eingangssignal U 200 an die der betrachteten Filterstufe 101 nachgeschaltete Filterstufe 101 übergeben. Basierend auf dem Ausgabesignal  $U_c$  204 der letzten Filterstufe 101 einer Zeile von Filterstufen 101 wird die einzustellende Güte der hintereinander geschalteten Filter 101 gemäß Gleichung (1) neu ermittelt. Aus dem so ermittelten Wert für die Güte Q wird der Wert des die Dämpfung bestimmenden Widerstands R gemäß Gleichung (2) berechnet. Mit dem veränderten Wert des ohmschen Widerstands R 203 werden die Filterwiderstände ( $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{13}$ ,  $G_{21}$ ,  $G_{22}$ ,

30

35

G23) und Filterkoeffizienten ( $g_1$ ,  $g_2$ ) gemäß Gleichungen (4) bis (11) neu berechnet. Nach diesem Schritt wird das Ausgabesignal für eine nächste Zeitscheibe berechnet. Mit anderen Worten kann das Zeitspektrum in mehrere Zeitscheiben  
5 zergliedert werden, die sukzessive numerisch berechnet werden.

Im Weiteren wird bezugnehmend auf **Fig.4** ein Diagramm 400 erläutert, in dem die Funktionalität der erfindungsgemäßen  
10 Schaltkreis-Anordnung gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung gezeigt ist. Diagramm 400 bezieht sich auf eine Schaltkreis-Anordnung mit  $N=4$  hintereinander geschalteten Resonator-Schaltkreisen. Als maximaler Q-Wert ist  $Q_0=10$  angenommen, als minimaler Q-Wert  
15 ist  $Q_{\min}=1$  angenommen.

Entlang einer Abszisse 401 des Diagramms 400 ist in einer logarithmischen Darstellung die auf eine Referenzfrequenz  $f_0$  normierte Frequenz eines Signals aufgetragen. Entlang einer  
20 Ordinate 402 ist in einer logarithmischen Darstellung die Reaktion des Systems auf ein Eingangssignal einer bestimmten Intensität gezeigt. Erste bis achte Kurven 403 bis 410 stellen die Frequenzgang (d.h. hier den jeweiligen Wert der Maximalamplitude des Filterausgangs) der erfindungsgemäßen  
25 Schaltkreis-Anordnung für unterschiedliche Signal-Amplituden (bezogen auf eine Referenzamplitude) dar. Die erste Kurve 403 entspricht einer Amplitude von  $1 \times 10^{-9}$ , die zweite Kurve 404 entspricht einer Amplitude von  $1 \times 10^{-4}$ , die dritte Kurve 405 entspricht einer Amplitude von  $1 \times 10^{-3}$ , die vierte Kurve 406  
30 entspricht einer Amplitude von  $1 \times 10^{-2}$ , die fünfte Kurve 407 entspricht einer Amplitude von  $1 \times 10^{-1}$ , die sechste Kurve 408 entspricht einer Amplitude von  $1 \times 10^0$ , die siebte Kurve 409 entspricht einer Amplitude von  $1 \times 10^1$  und die achte Kurve 410 entspricht einer Amplitude von  $1 \times 10^6$ . Ferner ist als  
35 Eingangssignal eine Sinusschwingung angenommen, die mit einem  $\cos^2$ -Fenster gefenstert ist. Kurven 403 bis 410 ergeben sich



für eine gesamte Filterbank aus  $N=4$  rückkopplungsfrei hintereinander geschalteten Resonator-Schaltkreisen.

Zunächst ist aus dem Diagramm 400 ersichtlich, dass die  
5 Dämpfung des Eingabesignals umso stärker ist, je höher die  
Signalintensität bzw. Signalamplitude ist. Bei sehr kleinen  
Amplituden sind die Filter linear und die Resonanzüberhöhung  
beträgt ungefähr 80dB. Die Antwort der Filterbank nimmt zu  
hohen tiefen Frequenzen sehr steil ab, da die Filter als  
10 Tiefpass realisiert sind (vgl. Fig. 2). Die hochfrequente  
Antwort der Filter fällt mit ungefähr 6dB pro Oktave ab,  
bedingt durch die Skalierung der Filterparameter mit  $f_0$ . Die  
Kurven in Fig.4 bilden die stark asymmetrische Frequenz-  
Selektivität des menschlichen Gehörs in guter Näherung nach.

15 Im Weiteren wird bezugnehmend auf **Fig.5** die Beziehung  
zwischen Amplituden des Eingabesignals und des Ausgabesignals  
einer erfindungsgemäßen Schaltkreis-Anordnung beschrieben.

20 In dem Diagramm 500 ist entlang einer Abszisse in  
logarithmischer Darstellung ein Schalldruckpegel  $A_{in}$  in dB  
aufgetragen, bezogen auf einen Schalldruck der Bezugsgröße  
20µPa. Entlang einer Ordinate 502 ist in willkürlichen  
Einheiten die Stärke eines Ausgabesignals  $A_{out}$  in dB  
25 aufgetragen. Kurven 503 bis 507 zeigen für unterschiedliche  
Szenarien die Wachstumsfunktion einer Filterkaskade aus vier  
Resonator-Schaltkreisen (Hintereinanderschaltung von  $N=4$   
Filtern) bei der Resonanzfrequenz  $f_0$ . Als minimale Güte ist  
 $Q_{min}=1$  angenommen.

30 Eine erste Kurve 503 zeigt eine lineare Wachstumsfunktion.  
Eine zweite Kurve 504 zeigt eine Wachstumsfunktion des  
Innenohrs, d.h. die Geschwindigkeit der Basilarmembran  
bezogen auf den Schalldruck gemessen vor dem Trommelfell. Die  
35 Daten der zweiten Kurve 504 sind aus [2] entnommen. Eine  
dritte Kurve 505 zeigt den Kurvenverlauf für eine Güte  $Q=2$ ,

eine vierte Kurve 506 zeigt den Verlauf für  $Q=4$  und eine fünfte Kurve 507 zeigt den Verlauf für  $Q=10$ .

5     Anschaulich ist in Fig.5 somit die Wachstumsfunktion eines  
Filterausgangs für  $f=f_0$  mit der Filtergüte  $Q$  als Parameter  
gezeigt. Bei sehr großen und sehr kleinen Amplituden sind die  
Wachstumsfunktionen näherungsweise linear. Auffällig ist der  
große Kompressionsbereich (insbesondere bei großem  $Q$ ), der  
10     sich über mehr als vier Dekaden erstreckt. Der große  
Dynamikbereich des Eingabesignals (100dB) wird auf 40dB (für  
 $Q=10$ ) komprimiert. Aufgrund der Resonanzüberhöhung werden  
leise Signale frequenzspezifisch "verstärkt". Die  
Wachstumsfunktion bildet am lebenden Hörsystem gemessene  
Schwingungsantworten sehr gut nach (vgl. mit Kurve 504).  
15     Daher ist mit der erfindungsgemäßen Schaltkreis-Anordnung  
eine näherungsweise technische Nachbildung der nichtlinearen  
Vorverarbeitung im Innenohr realisiert.

Im Weiteren wird bezugnehmend auf **Fig.6A** eine Schaltkreis-  
20     Anordnung 600 gemäß einem anderen bevorzugten  
Ausführungsbeispiel der Erfindung beschrieben.

Die Schaltkreis-Anordnung 600 ist gebildet aus einem ersten  
Resonator-Schaltkreis 601 und einem zweiten Resonator-  
25     Schaltkreis 602, von denen jeder aufgebaut ist wie der in  
Fig.2 gezeigte Resonator-Schaltkreis 101. Der zweite  
Resonator-Schaltkreis 602 ist dem ersten Resonator-  
Schaltkreis 601 nachgeschaltet.

30     Anschaulich kann die Schaltkreis-Anordnung 600 als direkt  
gekoppelte Realisierung von zwei ( $N=2$ ) hintereinander  
geschalteten Resonator-Schaltkreisen 601, 602 angesehen  
werden.

35     Wie in Fig. 6A gezeigt ist der zweite Anschluss der Spule 202  
des vorgeschalteten Resonator-Schaltkreises 601 mit dem  
ersten Anschluss des ohmschen Widerstandes 203 des

nachgeschalteten zweiten Resonator-Schaltkreises 602 gekoppelt.

Gemäß dem in Fig. 6A gezeigten Ausführungsbeispiel  
5 miteinander unmittelbar verkoppelter Resonator-Schaltkreise 601, 602 ist die Ausgabespannung  $U_{C1}$  des vorgeschalteten Resonator-Schaltkreises 601 gleich der Eingabespannung des folgenden Resonator-Schaltkreises 602. Ferner ist der Ausgabestrom des ersten Resonator-Schaltkreises 601 gleich  
10 dem Eingabestrom des zweiten Resonator-Schaltkreises 602.

Es ist anzumerken, dass die Werte der Widerstände  $R1$  bzw.  $R2$ , der Induktivitäten  $L1$  bzw.  $L2$  sowie der Kapazitäten  $C1$  bzw.  $C2$  der Resonator-Schaltkreise 601, 602 voneinander  
15 unterschiedlich sein können bzw. unterschiedlich eingestellt/geregelt werden können.

Im Weiteren wird bezugnehmend auf **Fig. 6B** eine Realisierung der in Fig. 6A gezeigten Resonator-Schaltkreise 601, 602 als  
20 Wellendigitalfilter 650 beschrieben.

Anschaulich ist das Wellendigitalfilter 650 gebildet aus einer ersten Komponente 651, welche den ersten Resonator-Schaltkreis 601 repräsentiert, und aus einer zweiten  
25 Komponente 652, welche den zweiten Resonator-Schaltkreis 602 repräsentiert. Entsprechend der verkoppelten Konfiguration der Resonator-Schaltkreise 601, 602 gemäß Fig. 6A sind die beiden Komponenten 651, 652 in der Fig. 6B gezeigten Weise direkt miteinander gekoppelt. Der interne Aufbau jeder der  
30 Komponenten 651, 652 entspricht im Wesentlichen jener des Wellendigitalfilters 300 aus Fig. 3.

Im Weiteren wird bezugnehmend auf **Fig. 7A** eine Schaltkreis-Anordnung 700 gemäß noch einem anderen Ausführungsbeispiel  
35 der Erfindung beschrieben.

Die Schaltkreis-Anordnung 700 ist gebildet aus einem ersten Resonator-Schaltkreis 701 und einem zweiten Resonator-Schaltkreis 702, welche in Serie geschaltet sind. Anschaulich sind die Resonator-Schaltkreise 701, 702 in einer voneinander entkoppelten Konfiguration hintereinander geschaltet, d.h., dass zwischen die Resonator-Schaltkreise 701 und 702 ein Zwischenelement geschaltet ist.

Jeder der Resonator-Schaltkreise 701, 702 ist im Wesentlichen aufgebaut wie der in Fig.2 gezeigte Resonator-Schaltkreis 101. Ferner ist zwischen dem ersten Resonator-Schaltkreis 701 und dem zweiten Resonator-Schaltkreis 702 ein Operationsverstärker 703 vorgesehen, wobei ein nichtinvertierender Eingang 703a des Operationsverstärkers 703 mit dem zweiten Anschluss der Spule 202 des vorgeschalteten ersten Resonator-Schaltkreises 701 gekoppelt ist. Ferner ist ein invertierender Eingang 703b des Operationsverstärkers 703 mit dessen Ausgang 703c rückgekoppelt und mit dem ersten Anschluss des ohmschen Widerstands 203 des dem ersten Resonator-Schaltkreis 701 nachgeschalteten zweiten Resonator-Schaltkreises 702 gekoppelt.

Gemäß dieser Konfiguration ist die Ausgabespannung des vorgeschalteten Resonator-Schaltkreises 701  $U_{C1}$  204 gleich der Eingabespannung des dem ersten Resonator-Schaltkreis 701 nachgeschalteten zweiten Resonator-Schaltkreises 702. Der Ausgabestrom eines jeweiligen Resonator-Schaltkreises ist Null. Der Eingabestrom des dem vorgeschalteten ersten Resonator-Schaltkreis 701 nachgeschalteten zweiten Resonator-Schaltkreises 702 beruht lediglich auf der Impedanz des nachgeschalteten zweiten Resonator-Schaltkreises 702. Wie in Fig.7A gezeigt, ist in Analogtechnik eine Realisation dieser Umstände mittels eines Impedanzwandlers realisierbar, der die Ausgabespannung des vorgeschalteten Resonator-Schaltkreises 701 dem Eingang des nachgeschalteten Resonator-Schaltkreises 702 einprägt.

Im Weiteren wird bezugnehmend auf **Fig.7B** ein Wellendigitalfilter 750 als Realisierung der Schaltkreis-Anordnung 700 aus Fig.7A beschrieben.

- 5 Das Wellendigitalfilter 750 ist in eine erste Komponente 751 und in eine zweite Komponente 752 aufgeteilt, wobei die erste Komponente 751 den ersten Resonator-Schaltkreis 701 repräsentiert, und wobei die zweite Komponente 752 den
- 10 zweiten Resonator-Schaltkreis 702 repräsentiert. Aufgrund der Funktionalität des Operationsverstärkers 703 sind die beiden Komponenten 751, 752 voneinander anschaulich gekoppelt. Der interne Aufbau jeder der Komponenten 751, 752 entspricht im Wesentlichen der in Fig.3 gezeigten Konfiguration. Das
- 15 Eingabesignal der ersten Komponente 751 ist U, das Eingabesignal der zweiten Komponente 752 ist  $U_{c1}$ .

In diesem Dokument sind folgende Veröffentlichungen zitiert:

[1] Schukat-Talamazzini, EG (1995) "Automatische  
Spracherkennung", Friedrich Vieweg & Sohn  
5 Verlagsgesellschaft, Braunschweig/Wiesbaden, ISBN 3-  
528-05492-1, Kapitel 1 bis 3

[2] Ruggero, MA et al. (2000) "Mechanical bases of frequency  
tuning and neural excitation at the base of the  
10 cochlea: comparison of basilar-membrane vibrations  
and auditory nerve-fiber responses in chinchilla",  
Proc.Natl.Acad. Sci. USA 97(22):11744-11750

[3] US 3,808,540  
15

[4] DE 24 01 816 C2

## Bezugszeichenliste

- 100 Schaltkreis-Anordnung
- 101 Resonator-Schaltkreise
- 102 globales Eingangssignal
- 103 (Schall-)Signalquelle
- 104 erstes lokales Ausgangssignal
- 105 erstes lokales Eingangssignal
- 106 zweites lokales Ausgangssignal
- 107 zweites lokales Eingangssignal
- 108 drittes lokales Ausgangssignal
- 109 globales Ausgangssignal
- 111 Steuer-Schaltkreis
- 200 Eingangssignal
- 201 Kapazität
- 202 Induktivität
- 203 regelbarer ohmscher Widerstand
- 204 Ausgangssignal
- 300 Wellendigitalfilter
- 301 erster Block (serieller Koppler)
- 302 zweiter Block (paralleler Koppler)
- 303 dritter Block (Speicherelement für Kapazität)
- 304 vierter Block (Speicherelement für Induktivität)
- 400 Diagramm
- 401 Abszisse
- 402 Ordinate
- 403 erste Kurve
- 404 zweite Kurve
- 405 dritte Kurve
- 406 vierte Kurve
- 407 fünfte Kurve
- 408 sechste Kurve
- 409 siebte Kurve
- 410 achte Kurve
- 500 Diagramm

501 Abszisse  
502 Ordinate  
503 erste Kurve  
504 zweite Kurve  
505 dritte Kurve  
506 vierte Kurve  
507 fünfte Kurve  
600 Schaltkreis-Anordnung  
601 erster Resonator-Schaltkreis  
602 zweiter Resonator-Schaltkreis  
650 Wellendigitalfilter  
651 erste Komponente  
652 zweite Komponente  
700 Schaltkreis-Anordnung  
701 erster Resonator-Schaltkreis  
702 zweiter Resonator-Schaltkreis  
703 Operationsverstärker  
703a nichtinvertierender Eingang  
703b invertierender Eingang  
703c Ausgang  
750 Wellendigitalfilter  
751 erste Komponente  
752 zweite Komponente



**Patentansprüche:**

1. Schaltkreis-Anordnung,  
die aufweist:

- 5 • einen Resonator-Schaltkreis zum Generieren eines  
Ausgabesignals aus einem Eingangssignal
    - o mit einer Kapazität und mit einer Induktivität,
    - o mit einem Eingang, an dem das Eingangssignal  
bereitstellbar ist;
    - 10 o mit einem Ausgang, an dem das Ausgabesignal  
bereitstellbar ist;
  - einen Steuer-Schaltkreis zum Steuern oder Regeln der  
Güte des Resonator-Schaltkreises, wobei der Steuer-  
Schaltkreis derart eingerichtet ist, dass er die Güte  
15 des Resonator-Schaltkreises abhängig von dem  
Signalverlauf der Signalamplitude des Eingangssignals  
und/oder des Ausgabesignals steuert oder regelt.
2. Schaltkreis-Anordnung nach Anspruch 1,  
20 bei welcher der Resonator-Schaltkreis einen mittels des  
Steuer-Schaltkreises steuerbaren ohmschen Widerstand aufweist.

3. Schaltkreis-Anordnung nach Anspruch 2,  
bei der

- 25 • das Eingangssignal zwischen einem ersten Anschluss des  
ohmschen Widerstands und einem ersten Anschluss der  
Kapazität bereitstellbar ist;
- das Ausgabesignal zwischen dem ersten Anschluss der  
Kapazität und einem zweiten Anschluss der Kapazität  
30 bereitstellbar ist;
- ein zweiter Anschluss des ohmschen Widerstands mit einem  
ersten Anschluss der Induktivität und ein zweiter  
Anschluss der Induktivität mit dem zweiten Anschluss der  
Kapazität gekoppelt ist.

35

4. Schaltkreis-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3,  
bei welcher der Steuer-Schaltkreis derart eingerichtet ist,

dass er die Güte des Resonator-Schaltkreises basierend auf einer Boltzmann-Funktion und/oder deren Ableitung steuert, wobei die Boltzmann-Funktion die Amplitude des Ausgabesignals als Parameter enthält.

5

5. Schaltkreis-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei welcher der Steuer-Schaltkreis derart eingerichtet ist, dass er die Güte des Resonator-Schaltkreises in Abhängigkeit von der Amplitude des Ausgabesignals basierend auf einer für  
10 ein Ohr eines Menschen ermittelten Empfindlichkeitscharakteristik einstellt.

6. Schaltkreis-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, bei welcher der Steuer-Schaltkreis derart eingerichtet ist,  
15 dass er die Güte des Resonator-Schaltkreises umso geringer einstellt, je höher die Amplitude des Ausgabesignals ist.

7. Schaltkreis-Anordnung nach Anspruch 6, bei welcher der Steuer-Schaltkreis derart eingerichtet ist,  
20 dass er die Güte des Resonator-Schaltkreises in einer nichtlinearen Abhängigkeit von der Amplitude des Ausgabesignals einstellt.

8. Schaltkreis-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, bei welcher der Steuer-Schaltkreis derart eingerichtet ist,  
25 dass er die Güte des Resonator-Schaltkreises derart einstellt, dass die Amplitude des Ausgabesignals innerhalb eines vorbestimmten Intervalls ist.

30 9. Schaltkreis-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, mit einer Mehrzahl von in Serie geschalteten Resonator-Schaltkreisen, wobei ein Ausgabesignal eines jeweils vorgeschalteten Resonator-Schaltkreises dem ihm jeweils nachgeschalteten Resonator-Schaltkreis als Eingabesignal  
35 bereitstellbar ist.

10. Schaltkreis-Anordnung nach Anspruch 9,

bei welcher der zweite Anschluss der Spule eines vorgeschalteten Resonator-Schaltkreises mit dem ersten Anschluss des ohmschen Widerstands des dem vorgeschalteten Resonator-Schaltkreis nachgeschalteten Resonator-Schaltkreises gekoppelt ist.

11. Schaltkreis-Anordnung nach Anspruch 9, mit einem Operationsverstärker zwischen einem vorgeschalteten Resonator-Schaltkreis und dem ihm nachgeschalteten Resonator-Schaltkreis, wobei

- ein erster Eingang des Operationsverstärkers mit dem zweiten Anschluss der Spule des vorgeschalteten Resonator-Schaltkreises gekoppelt ist;
- ein zweiter Eingang des Operationsverstärkers mit dessen Ausgang rückgekoppelt ist und mit dem ersten Anschluss des ohmschen Widerstands des dem vorgeschalteten Resonator-Schaltkreis nachgeschalteten Resonator-Schaltkreises gekoppelt ist.

12. Schaltkreis-Anordnung nach einem der Ansprüche 9 bis 11, bei welcher die Güte aller in Serie geschalteter Resonator-Schaltkreise identisch eingestellt ist.

13. Schaltkreis-Anordnung nach einem der Ansprüche 9 bis 11, bei welcher die Güte jeder der in Serie geschalteten Resonator-Schaltkreise individuell eingestellt ist.

14. Schaltkreis-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, mit einer Mehrzahl von parallel geschalteten Zweigen, von denen jeder einen Resonator-Schaltkreis oder mehrere in Serie geschaltete Resonator-Schaltkreise aufweist, wobei die Güte eines jeweiligen Resonator-Schaltkreises mittels des Steuer-Schaltkreises steuerbar ist.

15. Schaltkreis-Anordnung nach Anspruch 14, bei welcher der mindestens eine Resonator-Schaltkreis eines jeweiligen Zweigs derart eingerichtet ist, dass er für einen

jeweiligen Frequenzbereich des Eingabesignals durchlässig ist derart, dass die Zweige gemeinsam für ein zusammenhängendes Frequenzintervall durchlässig sind.

- 5 16. Schaltkreis-Anordnung nach Anspruch 15,  
bei der die Frequenzbereiche, für die unterschiedliche Zweige durchlässig sind, zumindest teilweise einander überlappen.

- 10 17. Schaltkreis-Anordnung nach Anspruch 15 oder 16,  
bei welcher der Frequenzbereich, für den ein jeweiliger Zweig durchlässig ist, mittels Einstellens des Werts der Kapazität und/oder der Induktivität des mindestens einen Resonator-Schaltkreises des Zweigs vorgebar ist.

- 15 18. Schaltkreis-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 17,  
die zum Verarbeiten eines akustischen Signals als Eingabesignal eingerichtet ist.

19. Signalverarbeitungs-Vorrichtung  
20 • mit einer Schaltkreis-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 18;  
• mit einer Weiterverarbeitungs-Einheit zum Weiterverarbeiten des Ausgabesignals.

- 25 20. Signalverarbeitungs-Vorrichtung nach Anspruch 19,  
bei der die Weiterverarbeitungs-Einheit  
• eine Spracherkennungs-Einrichtung; oder  
• ein Hörgerät;  
ist.

30

21. Signalverarbeitungs-Vorrichtung nach Anspruch 16 oder 17,  
eingerrichtet als analoge- oder digitale Filterbank.